

원통연삭가공시 반도체 레이저 빔을 이용한 금속표면거칠기의 인프로세스 측정

김희남*, 이주상**, 김순채**

A Study on the In-process Measurement of Metallic Surface roughness in Cylindrical Grinding by Diode Laser

Kim. H. N. Lee. J. S. Kim. S. C

Key words : surface roughness, ground surface, in-process, cylindrical grinding, stylus method

ABSTRACT

This paper proposed a simple method for measuring surface roughness of ground surface, utilizing non-contact in-process measuring system using the diode laser. The measurement system is consisted of a laser unit with a diode laser and a cylindrical lens, a detecting unit with polygon mirror and CCD array sensor, and a signal processing unit with a computer and device. During operation, this measuring system can provide information on surface roughness in the measuring distance with a single sampling and simultaneously monitor the state of the grind wheel. The experimental results, showed that the increase of the feed rate and the dressing speed an caused increase in the surface roughness and when the surface roughness is $4R_{max} \sim 10R_{max}$, the cutting speed is $1653m/min \sim 1665m/min$, the feed rate is $0.2m/min \sim 0.9m/min$, the dressing speed is $0.2mm/rev \sim 0.4mm/rev$, the stylus method and the in-process method can be obtained the same results. thus, under limited working conditions, using the proposed system, the surface roughness of the ground surface during cylindrical grinding can be obtained through the in-process measurement method using the diode laser.

1. 서 론

오늘날 공작기계의 고정도화, 가공방법의 신기술화, 각종 재료의 신소재화 등에 따른 기계가공분야의 급속한 발달로 생산품과 기계부품에 대해 요구되는 정밀도는 높아지고 있다. 제품을 평가하는 방법중 하나인 표면거칠기 판정에는 촉침식(stylus method)이 현재까지 널리 사용되고 있으나 이 방법은 기계적인 접촉으로 인하여 측정물에 측정흔적을 남기고 가공이 완료된 후에 측정이 이루어지기 때문에 시간적 손실 및 생산성에 크게 영향을 받으며 숙련자를 필요로 하는 등 불합리성이 내재되어 있다. 이러한 점들을 개선하기 위하여 비접촉식 측정법들이 연구되어 왔고 생산가공에 있어서의 시간적, 경제적 손실을 최소화하기 위하여 광응용 인프로세스 측정 기술개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구는 J.C.Stover¹⁾, M.Shiraiishi^{2),3)}, I.Inasaki⁴⁾등에

의하여 연구되어 왔으나 앞으로도 다양한 연구가 진행되어야 할 것이다. 본 연구는 선삭가공과 더불어 기계가공의 주류를 이루고 표면의 마무리 가공이나 가공면의 정도향상과 정밀한 치수를 요구하는 제품생산에 사용되는 연삭가공을 이용하여 건식 원통연삭가공시 연삭가공면의 표면거칠기를 초경량, 초소형 반도체 레이저를 이용하여 in-process 측정하고 적용가능성을 검토한다. 기존의 연구방법은 광촉침을 이용하는 방법으로 가공중 공작물의 산과 골의 일직선상의 동일 측정부위를 찾는 데 어려움을 겪거나 encorder등을 이용하여 공작물의 한회전마다 sampling해야 하는 불편함이 있었다. 또한 신호를 입수하는 시간이 많이 걸리고 데이터양도 원주방향에 따른 데이터까지 입수되어 너무 방대하다. 그러나 이 연구에서 새로이 제안된 방법은 측정하고자 하는 측정구간을 line 빔의 형태로 one sampling 함으로서 이와 같은 불합리한 점을 해결하였다.

* 명지대학교 기계공학과

** 명지대학교 기계공학과 대학원

2. 관련이론

광학적 측정방법은 일반적으로 표면거칠기 변수의 산출방식에 따라 매개변수법과 비매개변수법으로 나눈다. 매개변수법은 표면의 재현성은 떨어지나 측정 system이 간단하고 한번의 sampling으로 측정이 가능하므로 in-process 측정에 주로 많이 사용되고 있으며 비매개변수법은 표면의 재현성과 정확성은 높지만 sampling과 data처리에 시간이 많이 소요되고 복잡하다.

매개변수법에서는 주로 광산란 방법이 in-process 측정에 가장 많이 적용되고 있는데 이는 측정표면에 광을 입사시킨 후 산란되는 반사광량을 검출하고 반사광량들의 산란패턴을 특성화하여 표면거칠기를 산출한다.

광산란법에 의한 표면거칠기 측정에는 Beckmann' kirchhoffer의 전자과산란이론을 이용하여 많이 응용되고 있는데 입사광속의 광파를 표시하는 전기장의 크기 E_1 은

$$E_1 = A \text{Exp}(i k_1 \cdot \vec{r})$$

반사공간상의 임의의 한 점 p에서 반사광의 스칼라크기 E_2 는

$$E_2(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S \{ E_1 \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial E_1}{\partial n} \} dS \quad (1)$$

$$\phi = \text{Exp}(i k_2 l) / l$$

l 은 반사점에서부터 점p까지의 거리이고 k_2 는 반사광의 전파벡터이다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{i}{l_0} \text{Exp}(i k_2 l_0 - i k_2 \cdot \vec{r}') k_2 \cdot \vec{n}$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial n} = i(1-R)E_1 k_1 \cdot \vec{n}$$

표면돌기들의 곡률반경이 λ 에 비하여 충분히 커서 광파의 전기장이 반사점의 접평면(tangential plane)에 존재하면

$$\frac{\partial E_1}{\partial n} = i(1-R)E_1 k_1 \cdot \vec{n} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{i}{l_0} \text{Exp}(i k_2 l_0 - i k_2 \cdot \vec{r}') k_2 \cdot \vec{n} \quad (3)$$

이고, 일차원 거칠기측정을 위해 표면의 폭을 단위 폭으로 간주하여 일차원 산란을 취급하면 면적적분을 표면의 단면곡선에 따르는 선적분으로 대체할 수 있고 입사광의

입사길이를 $2L$ 로 하여 $-L \leq x \leq L$ 의 적분구간으로 고려하면

$$E_2(\theta) = KC \int_{-L}^L \text{Exp}(i \vec{v} \cdot \vec{r}) dx + KC \int_{-L}^L \text{Exp}(i \vec{v} \cdot \vec{r}) dx \quad (4)$$

로 반사각 θ 를 갖는 산란광 강도이며 두번째 항은 $L \gg \lambda$ 인 경우에 항이 무시됨으로 (4)항을 단순화 하면 반사각 θ 방향의 산란광의 광강도(light intensity)는

$$I(\theta) = \left| KC \int_{-L}^L \text{Exp}(i \vec{v} \cdot \vec{r}) dx \right|^2 \quad (5)$$

이며 적분항은 반사방향에 따른 산란광의 위상변화 효과가 산란광의 광강도에 미치는 영향을 나타내고 계수항 KC는 표면의 반사능에 따른 에너지손실 효과와 반사각에 따른 에너지 분배효과가 광강도에 미치는 영향을 나타낸다. (5)를 확률분포곡선인 연삭표면에 적용하기 위하여 다시쓰면

$$I(\theta) = 2L |KC|^2 \int_{-L}^L \text{Exp}(i v_x \tau) x_2 (v_2 - v_2) dt$$

가 된다. $x_2(v_2 - v_2)$ 는 위상변조의 2차원적 평균을 의미한다. τ 는 두 표면돌기 사이의 분리거리(separation distance)를 나타내는 변수이다. 확률표면의 경우 산란광의 광강도가 확률변수로 주어지며 그 평균값은 2차원 특성함수를 이용하여 분리거리 τ 를 $-L \leq \tau \leq L$ 구간에 대해 적분함으로써 계산된다. 따라서 이상의 광산란이론은 표면의 반사능력이 주어졌을 때 측정된 광강도로부터 적분값을 구할수 있게 하고 거칠기값을 산출할 수 있게 한다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

측정계는 Fig. 1에 도시하였으며 Fig. 2는 사진이다. 기본적으로 측정계는 레이저부, 검출부 그리고 신호처리계로 이루어져 있다. 반도체 레이저와 cylindrical 렌즈로 구성된 레이저부는 연삭숫돌표면에 수직인 위치에 고정되어 있으며, 검출부와 신호처리계는 연삭숫돌

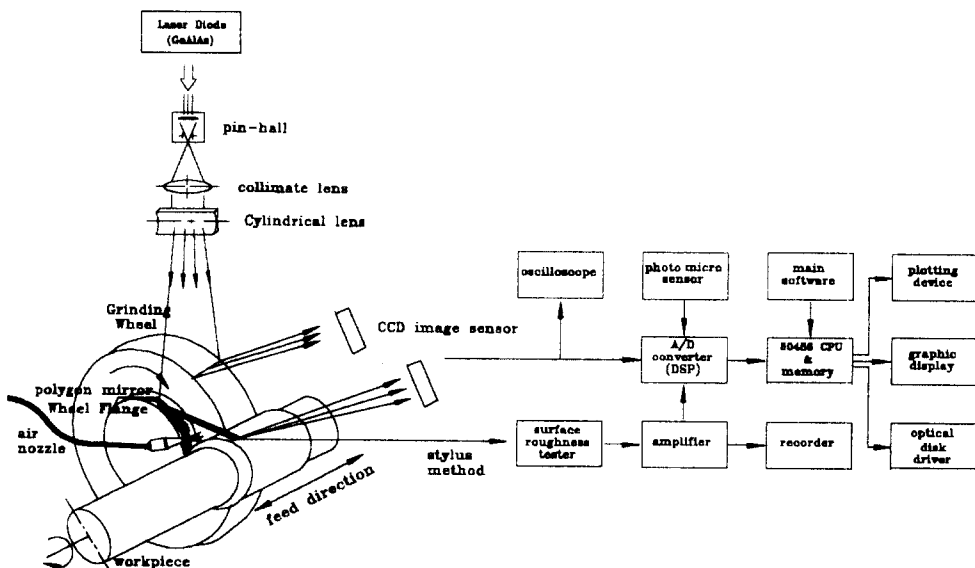


Fig. 1 Schematic diagram of the in-process measurement system

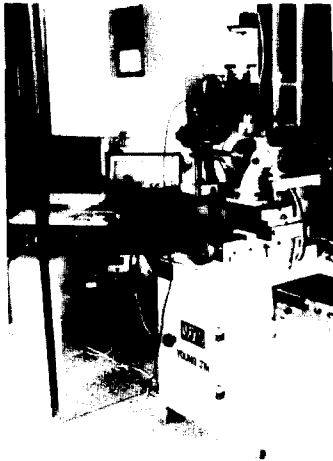


Fig. 2 Layout of the experimental system(photo.)

반대편에 고정되어 측정에 악영향을 주는 연기와 칩으로부터 보호되어 있다. 검출부는 1024개의 photodiode cell로 구성된 CCD array sensor를 사용하여 산란광의 강도를 검출하고 신호처리계는 oscilloscope와 A/D converter등으로 구성되어 검출된 신호를 입수하고 적절한 처리 과정을 거쳐 필요로 하는 데이터로 처리하고 저장한다. 본 실험에서 사용된 기계 및 기기는 다음과 같다.

- (1) Tool grinding machine : Model TG-46 (YoungJin Precision Machine Co.)
- (2) Light source : Diode Laser (Liconix DIOLITE 800) Max. power 40mW, Wavelength 834
- (3) CCD array sensor : spectral range 350 to 1100nm, sample rate 6ms 166Hz
- (4) A/D converter : Arial DSP-plus 16bit, 2channel, 50kHz
- (5) Photo micro sensor : high response DC 5-15V 80mA
- (6) Oscilloscope : Digital 500kHz TDS320 Textronix
- (7) Surface roughness test : SURFTTEST 402 Mitutoyo Co.
- (8) Computer : IBM compatable 32bit intel-80486 /66 DX2
- (9) Optical magnetic disk driver : ODD 600Mb

3-2. 시 편

본 실험에서 사용된 시편은 기계구조용 탄소강 (SM45C)을 사용하였으며 이 시편의 재질에 대한 기계적성질과 화학적성분은 Table 1과 같다. 시편은 가공조건에 의하여 실험하기 전에 모든 시편의 초기 표면상태는 균일하여야 한다. 따라서 모든 시편을 CNC선반에서 1차 형상가공을 한 후 절삭속도 4438m/min, 시편 이송속도 0.3m/min, 절입깊이 0.01mm의 연삭조건으로 spark-out 될때까지 건식

연삭가공하여 시편을 제작하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 시편의 형상과 치수를 나타내고 그 사진이다.

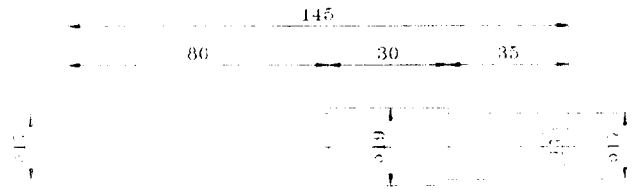


Fig. 3 Dimension of the test

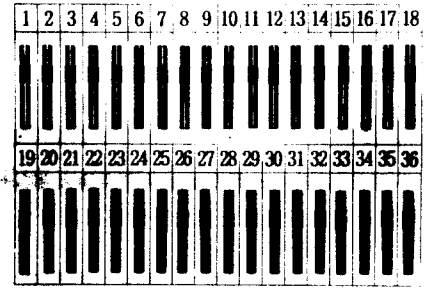


Fig. 4 Layout of the test specimens(photo.)

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of the specimen

A) Mechanical properties

| Material | Workpiece speed (m/min) | Tensile strength (kgf/mm ²) | Elongation (%) | Hardness (H _{RB}) |
|----------|-------------------------|---|----------------|-----------------------------|
| SM45C | 42 | 56 | 21 | 91 |

B) Chemical composition

| Material | C | Si | Mn | P | S | Fe |
|----------|------|------|------|------|-------|---------|
| SM45C | 0.45 | 0.25 | 0.78 | 0.03 | 0.035 | Balance |

3-3. 실험방법

반도체 레이저 발진기로 부터 발생된 광속은 렌즈 광학계를 통하여 발진되어 cylindrical lens에서 line빔의 형태로 변화되어 20mW의 반도체 레이저빔은 0°의 입사각을 갖고 연삭숫돌 표면과 polygon mirror에 수직으로 입사된다. 연삭숫돌 표면에 입사된 빔은 숫돌의 원주방향에 직각인 방향으로 1 line scan하며 측정시간 동안 가공과 동시에 CCD array sensor에서 검출되고 검출된 신호를 통하여 가공중 숫돌상태를 측정한다. polygon mirror에 입사된 빔은 line 빔의 형태로 시편의 측정부위를 조사하게 되며 산란된 빔은 CCD array sensor에서 검출된다. 측정구간의 시작점에 설치된 photo sensor 1에서 시편의 이송방향의 신호입수 개시를 알리고

photo sensor 2에서 시편의 회전방향에 대해 감지한다. Fig. 5는 신호입수 과정을 나타낸 것이다. 이와같은 측정실험을 하기 위하여 기계구조용 탄소강을 공작물로 사용하여 임의의 거칠기가 나올 수 있도록 가공조건을 변화시켜 가공과 동시에 in-process 측정되어 입수된 거칠기값과 가공완료 후 측정식 측정계로 측정된 거칠기값을 비교하여서 in-process 측정계의 적용 가능성을 검토한다. table 2는 가공조건을 나타낸 것이다.

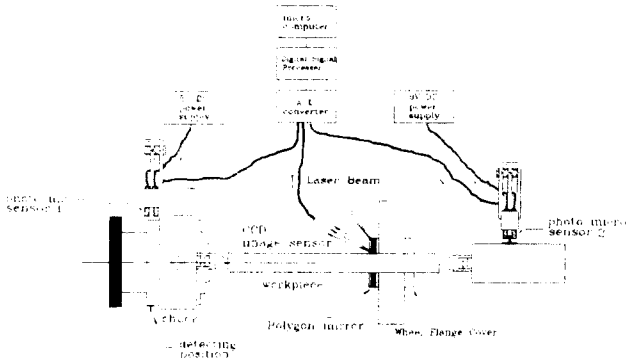


Fig. 5 Close-up of the data acquisition system

Table 2 working condition

| Wheel speed (m/min) | Workpiece speed (m/min) | Table speed (m/min) | Dressing speed (mm/rev) | Depth of cut (μm) | Wheel |
|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------|-------|
| 1649 | 4 | 0.2 | 0.2 | 10 | WA80K |
| | 7 | 0.6 | 0.4 | | |
| | 11 | 0.9 | 0.6 | | |
| | 16 | | | | |

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화가 인프로세스 측정에 미치는 영향

절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 값을 측정하기 위하여 연삭숫돌을 0.2mm/rev의 이송속도로 드레싱한 후 공작물 테이블의 이송속도를 각각 0.2m/min, 0.6m/min, 0.9m/min로 하고 절삭속도를 1653m/min, 1656m/min, 1660m/min, 1665m/min로 각각 변화시켜 가면서 가공을 수행하였으며 다시 연삭숫돌을 0.2mm/rev, 0.4mm/rev, 0.6mm/rev의 속도로 드레싱하여 가공하였다. 이때 고정된 가공조건으로는 드레싱 절삭깊이 0.01mm, 가공 절삭깊이 0.01mm로 하고 숫돌은 WA80K를 사용하였다. 여기서 연삭기의 주속도는 1649m/min이므로 공작물의 주속도는 각각 4m/min, 7m/min, 11m/min, 16m/min가 된다.

Fig. 6, 7, 8은 드레싱 속도는 0.2mm/rev로 고정하고 이송속도를 0.2, 0.6, 0.9m/min으로 변화시킬 때 각 절삭속도에 대한 측정결과이다. 절삭속도가 증가할 수록 표면거칠기값은 낮아지는 경향을 알 수 있다. 테이블

이송속도와 드레싱속도가 낮고 절삭속도가 1653m/min, 1656m/min인 영역에서는 in-process 방법으로 측정된 거칠기값과 측정식 방법으로 측정된 표면거칠기값이 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 9, 10, 11, 12, 13, 14에서도 동일한 결과를 나타내고 있으나 표면거칠기값이 10Rmax 이상으로 높거나 4Rmax 이하로 낮을 때에는 in-process 측정과 측정식 측정값이 다소 차이가 있음을 알 수 있는데 이것은 거친 표면에서는 입사광선이 가공물 표면에서 반사될 때 심하게 산란되어 반사광량을 제대로 검출하지 못하기 때문이고 고온 표면에서는 산란빔이 정반사 방향으로 집중되기 때문이라고 생각한다. 따라서 절삭속도 1653m/min~1665m/min의 영역과 표면거칠기값이 4Rmax~10Rmax 영역에서는 두 측정계로 측정된 값들이 일치함을 알 수 있고 적용 가능하다고 할 수 있다.

4-2. 이송속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화가 인프로세스 측정에 미치는 영향

이송속도의 변화에 따른 표면거칠기의 값을 측정하기 위하여 연삭숫돌을 0.2mm/rev의 이송속도로 드레싱한 후 공작물 테이블의 이송속도를 각각 0.2m/min, 0.6m/min, 0.9m/min로 하고 절삭속도를 1653m/min, 1656m/min, 1660m/min, 1665m/min로 각각 변화시켜 가면서 가공을 수행하였으며 다시 연삭숫돌을 0.2mm/rev, 0.4mm/rev, 0.6mm/rev의 속도로 드레싱하여 가공하였다. 이때 고정된 가공조건으로는 드레싱 절삭깊이 0.01mm, 가공 절삭깊이 0.01mm로 하고 숫돌은 WA80K를 사용하였다. 여기서 연삭기의 주속도는 1649m/min이므로 공작물의 주속도는 각각 4m/min, 7m/min, 11m/min, 16m/min가 된다.

Fig. 15~Fig. 26은 각각의 가공조건에서 테이블의 이송속도의 변화에 따른 표면거칠기를 in-process 계측된 값과 가공완료 후 측정식 측정계로 측정된 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 15, 16, 17은 절삭속도를 1653m/min으로 고정하고 드레싱속도를 0.2, 0.4, 0.6m/min으로 변화시킬 때 각 이송속도에 대하여 측정된 결과이다. 이송속도가 0.2mm/rev~0.9mm/rev의 영역에서 in-process 측정결과와 측정식 측정결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26에서도 동일한 결과를 나타내고 있다. 드레싱속도가 증가하고 이송속도가 0.9m/min으로 드레싱 속도보다 현저하게 빠를 경우에는 표면거칠기값이 증가함을 알 수 있다.

4-3. 드레싱속도의 변화가 표면거칠기의 변화가 인프로세스 측정에 미치는 영향

드레싱속도의 변화에 따른 표면거칠기의 값을 측정하기 위하여 드레싱속도를 각각 0.2m/min, 0.4m/min, 0.6m/min로 하고 절삭속도를 1653m/min, 1656m/min, 1660m/min, 1665m/min로, 공작물 이송속도를

0.2m/min, 0.6m/min, 0.9m/min으로 각각 변화시켜 가면서 가공을 수행하였다. 이때 고정된 가공조건으로는 드레싱 절삭깊이 0.01mm, 가공 절삭깊이 0.01mm로 하고 슷들은 WA80K를 사용하였다. Fig. 27~Fig. 38은 각각의 가공조건에서 드레싱속도의 변화에 따른 표면거칠기를 in-process계측된 값과 가공완료 후 측정식 측정계로 측정한 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 27, 28, 29은 절삭속도를 1653m/min으로 고정하고 이송속도를 0.2, 0.6, 0.9m/min으로 변화시킬 때 각 드레싱속도에 대하여 측정한 결과이다. 드레싱속도가 0.2mm/rev~0.4mm/rev의 영역에서 in-process 측정결과와 측정식 측정결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험결과에서 드레싱속도가 낮은 영역에서는 표면거칠기값이 낮고 0.6mm/rev의 영역에서는 높아짐을 볼 수 있듯이 슷들의 드레싱속도가 증가할 수록 가공물 표면은 거칠게 가공되는 것을 알 수 있다. Fig. 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38에서도 동일한 결과를 나타내고 있다. 드레싱속도가 증가하고 이송속도가 드레싱 속도보다 빠를 경우에는 표면거칠기값이 증가함을 알 수 있다. 그러므로 본 실험에서 제안된 측정계는 드레싱속도가 0.2mm/rev~0.4mm/rev의 영역에서 적용 가능하다.

4-4. 슷돌상태의 감시

본 실험에서 제안된 측정계를 이용하여 연삭가공을 실시하고 가공면의 표면거칠기값을 측정하면서 동시에 연삭스틀의 상태를 파악해 보았다. 반도체 레이저에서 발진된 빔은 cylindrical lens에서 line빔으로 변하여 슷돌면에 입사된다. 입사된 빔은 슷돌표면에서 산란되고 산란광속에 포함된 슷돌표면의 정보는 CCD array sensor에서 검출된다. 본 실험의 대상은 WA80K의 슷돌을 이용하였다. 슷돌면에는 연속적인 빔이 입사되지만 photo sensor를 이용하여 측정하고자 하는 순간에 sampling할 수 있다. 절삭깊이 0.01mm, 절삭속도 1665m/min, 이송속도 0.2m/min의 실험조건으로 시편을 spark-out될 때까지 가공하면서 6회 실험하였다. Fig. 39는 실험결과를 나타내고 있다. 1(0)회와 2회(A.2)에서는 변화를 보이지 않았으나, 3(A.3) 4(A.4), 5(A.5)회에서는 400pixel부근에서 변화를 보이고 있음을 알 수 있고, 6(A.6)회에서는 그 폭이 더욱 커진 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험의 결과를 통하여 측정 가능성을 제시하고 있으며 앞으로 많은 부분에서 더욱 보완되어야 할 것이고 본 측정계를 이용한 연삭스틀면 상태의 검사는 다양한 실험조건에서 연구되어야 할 향후 연구과제이다.

5. 결론

연삭가공에 있어 가공조건을 절삭속도의 변화, 이송속도의 변화, 드레싱속도의 변화로 주고 각 조건에 따라 원통연삭가공된 연삭표면에 대한 in-process측정을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻는다.

- 1) 본 실험에서 제안된 방법을 이용하여 원통연삭 가공시 표면거칠기를 in-process측정할 수 있다
- 2) 절삭속도의 증가에 따라 표면거칠기는 양호해 지며 10Rmax이하의 가공면에 대하여 신뢰할 만한 측정 결과를 얻었다.
- 3) 절삭속도에 비해 이송속도와 드레싱속도가 지나치게 빠르면 비정상적인 연삭상태가 생성되며 드레싱 속도가 0.6mm/rev일 경우에는 가공면이 거칠게 되어 반사광량의 심한 산란으로 측정이 곤란하다.
- 4) cylindrical lens를 이용하여 입사빔을 line빔으로 만들어 연삭가공면의 표면거칠기와 슷들의 표면 상태를 동시에 측정할 수 있는 가능성을 제시한다.
- 5) 제안된 측정계는 초소형, 초경량화로 구조가 간단 하며 설치가 용이하여 현장적응력이 극대화 될 수 있다.

참고문헌

- 1) John C. Stover; Roughness characterization of smooth machined surface by light scattering, Applied Opt., Vol.14, No.8, Aug.1975
- 2) M. Shiraishi; In-process measurement of surface roughness in turning by Laser beams, ASME, Vol. 103, pp.203~209, May.1981
- 3) M. Shiraishi; A consideration of surface roughness measurement by optical method, ASME, Vol.109, pp. 100~105, May.1987
- 4) I. Inasaki; In-process measurement of surface roughness during cylindrical grinding process, Precis.eng., Vol.7, No.2, pp73~76, 1985
- 5) K.Kim, K.F. Eman; In-process control of cylindricity in boring operations, ASME, Vol.109, pp.291~296, Nov.1987
- 6) C.S.Lee, D.Y.Yim; An In-process Measurement Technique Using Laser for Non-Contact Monitoring of Surface Roughness and Form Accuracy of Ground Surface, Annals of the CIRP, Vol.36, pp.425~428, Jan, 1987
- 7) B.P.Hildebrand, R.J.Gordon and E.V.Allen; Instrument for measuring measuring the roughness of super smooth surface, Applied Opt., Vol 13, No.1, Jan. 1974
- 8) Robert K. ERF; Laser application, Vol.4, Academic press, PP.2~69, 1980
- 9) D.G.Jansson, J.M.Rourke, and A.C.Bell; High-speed surface roughness measurement, ASME, Vol.106, pp.34~39, Feb.1984
- 10) E.C.Teague, T.V.Vorburger, and D.Maystre; Light scattering from manufactured surfaces, Annals of the CIRP, Vol.30, No.2, pp.563~569, 1981

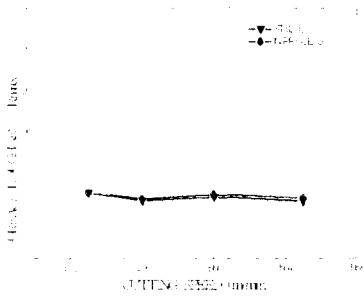


Fig. 6 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.2m/min), dressing speed(0.2mm/rev)

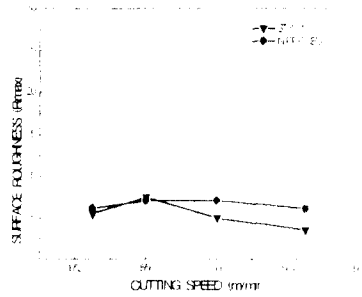


Fig. 7 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.6m/min), dressing speed(0.2mm/rev)

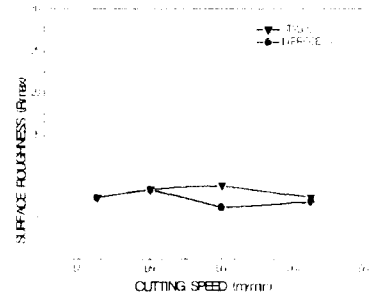


Fig. 8 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.9m/min), dressing speed(0.2mm/rev)

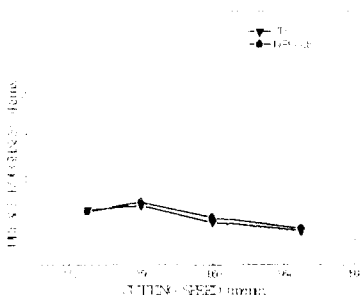


Fig. 9 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.2m/min), dressing speed(0.4mm/rev)

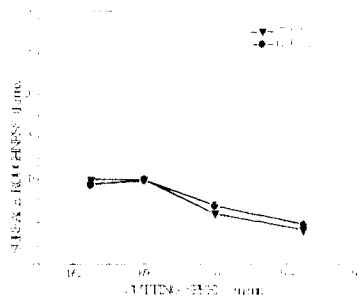


Fig. 10 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.6m/min), dressing speed(0.4mm/rev)

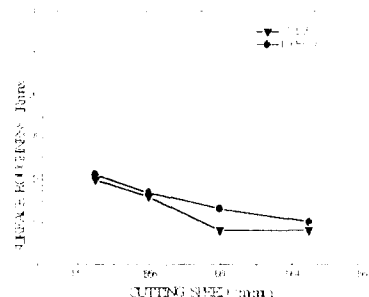


Fig. 11 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.9m/min), dressing speed(0.4mm/rev)

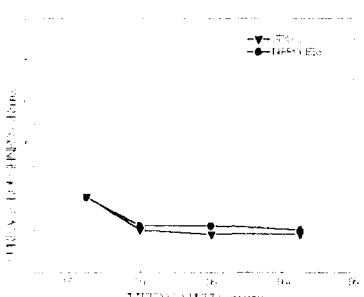


Fig. 12 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.2m/min), dressing speed(0.6mm/rev)

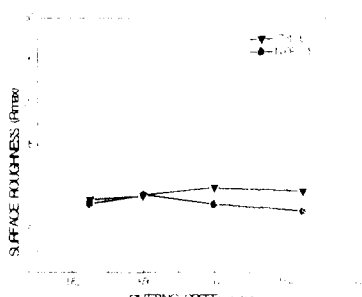


Fig. 13 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.6m/min), dressing speed(0.6mm/rev)

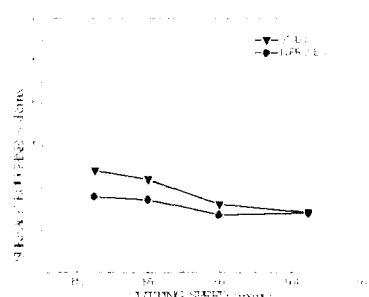


Fig. 14 Surface roughness vs. cutting speed at table speed(0.9m/min), dressing speed(0.6mm/rev)

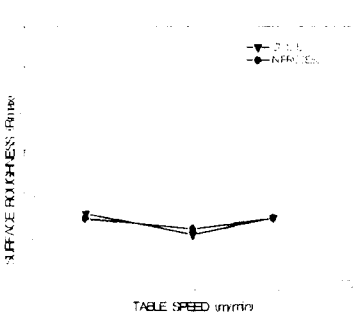


Fig. 15 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.2mm/rev), cutting speed(1653m/min)

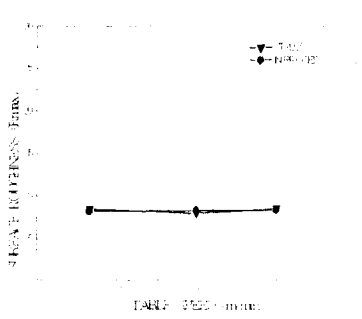


Fig. 16 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.4mm/rev), cutting speed(1653m/min)

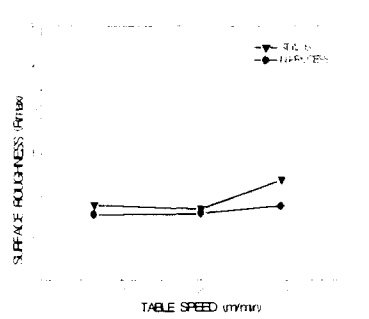


Fig. 17 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.6mm/rev), cutting speed(1653m/min)

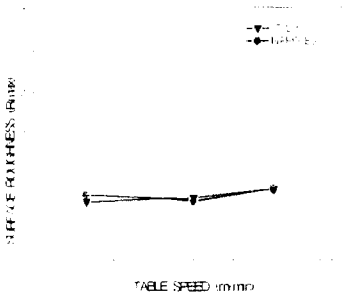


Fig. 18 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.2mm/rev), cutting speed(1656m/min)

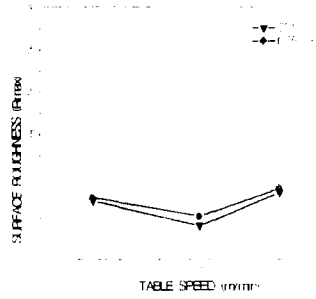


Fig. 19 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.4mm/rev), cutting speed(1656m/min)

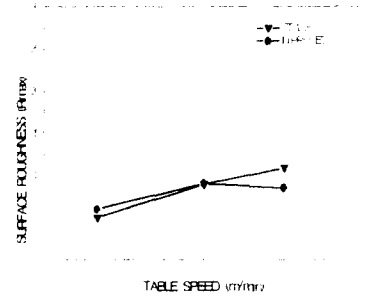


Fig. 20 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.6mm/rev), cutting speed(1656m/min)

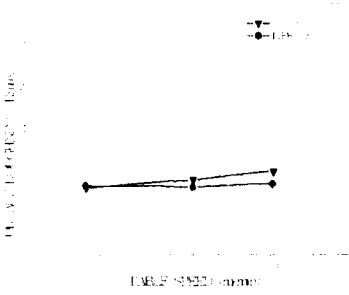


Fig. 21 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.2mm/rev), cutting speed(1660m/min)

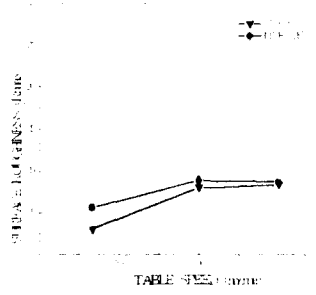


Fig. 22 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.4mm/rev), cutting speed(1660m/min)

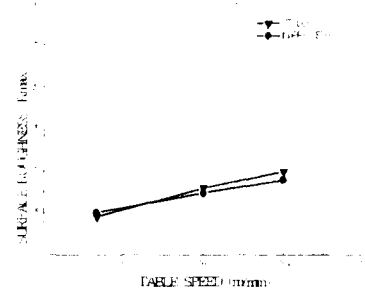


Fig. 23 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.6mm/rev), cutting speed(1660m/min)

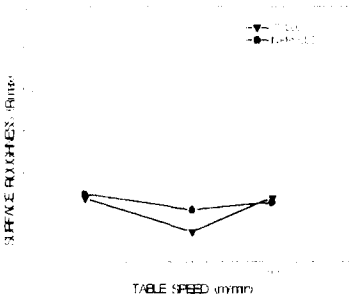


Fig. 24 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.2mm/rev), cutting speed(1665m/min)

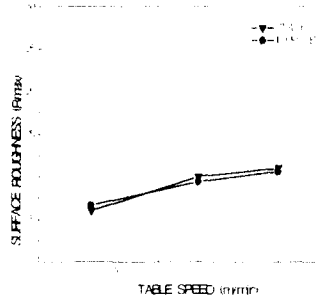


Fig. 25 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.4mm/rev), cutting speed(1665m/min)

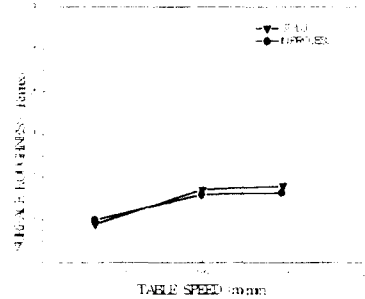


Fig. 26 Surface roughness vs. table speed at dressing speed(0.6mm/rev), cutting speed(1665m/min)

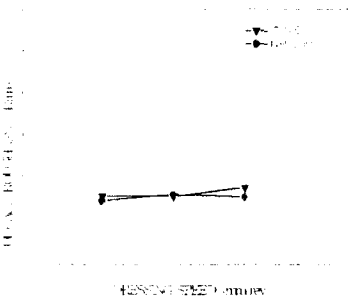


Fig. 27 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.2mm/rev), cutting speed(1653m/min)

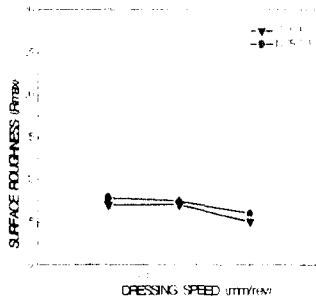


Fig. 28 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.4mm/rev), cutting speed(1653m/min)

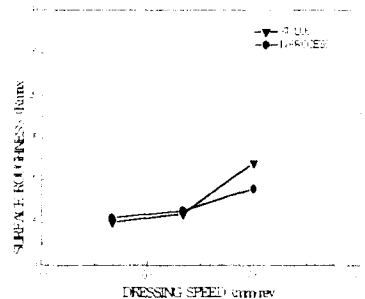


Fig. 29 Surface roughness vs. table speed at table speed(0.6mm/rev), cutting speed(1653m/min)

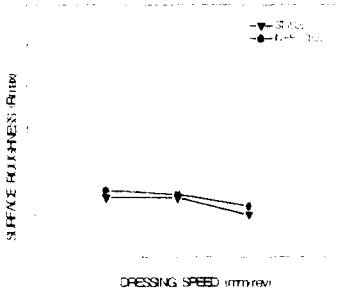


Fig. 30 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.2mm/rev). cutting speed(1656m/min)

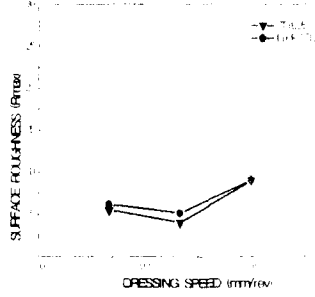


Fig. 31 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.4mm/rev). cutting speed(1656m/min)

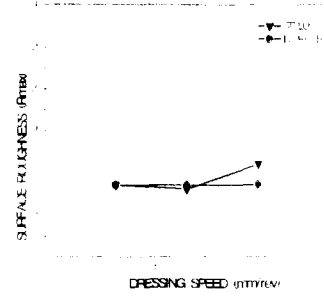


Fig. 32 Surface roughness vs. table speed at table speed(0.6mm/rev). cutting speed(1656m/min)

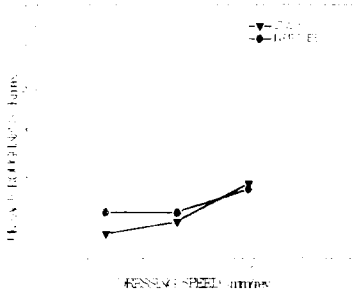


Fig. 33 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.2mm/rev). cutting speed(1660m/min)

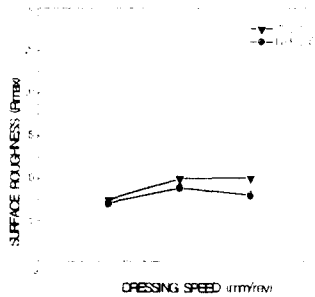


Fig. 34 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.4mm/rev). cutting speed(1660m/min)

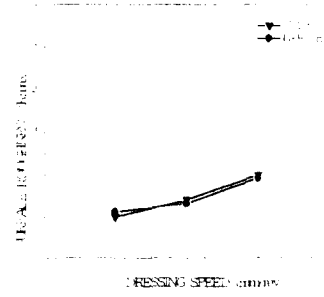


Fig. 35 Surface roughness vs. table speed at table speed(0.6mm/rev). cutting speed(1660m/min)

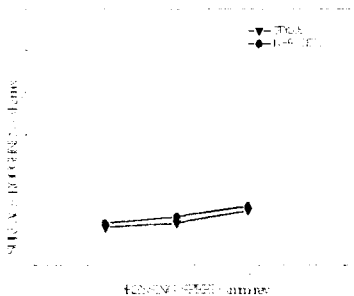


Fig. 36 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.2mm/rev). cutting speed(1665m/min)

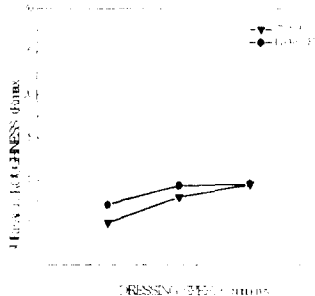


Fig. 37 Surface roughness vs. dressing speed at table speed(0.4mm/rev). cutting speed(1665m/min)

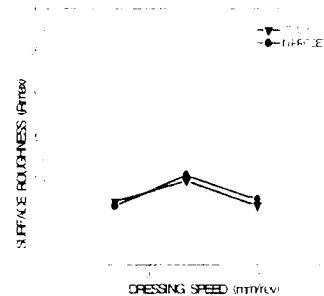


Fig. 38 Surface roughness vs. table speed at table speed(0.6mm/rev). cutting speed(1665m/min)

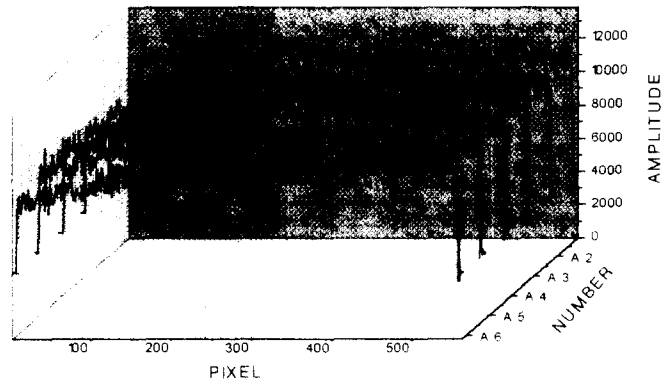


Fig. 39 Measuring number vs. the state of grind wheel